

Dr Dragutin Jovanović,
pukovnik, dipl. inž.
Mr Milorad Opsenica,
potpukovnik, dipl. inž.
Vojnotehnička akademija VJ,
Beograd

PUTNI PRELAZI PREKO ŽELEZNIČKE PRUGE KAO USKA GRILA

UDC: 625.746.1

Rezime:

Putni prelazi preko železničke pruge, odnosno mesta gde se ukrštaju železnički i putni saobraćaj u nivou, predstavljaju uska grla sa stanovišta protoka vozila kao jednog od osnovnih parametara za opisivanje saobraćajnog toka. Za železnički saobraćaj to su oslabljena mesta u koloseku, zbog izloženosti šina dinamičkom uticaju drumskih vozila.

Radi očuvanja bezbednosti saobraćaja moraju se obezbediti adekvatni trouglovi preglednosti, kako za kolosek u pravcu, tako i za kolosek u krivini i blagom useku. Učesnici u putnom saobraćaju znatno su ugroženiji od učesnika u železničkom saobraćaju. Na putnim prelazima sa izraženijom dinamikom železničkog saobraćaja dolazi do vremenskih i materijalnih gubitaka u okviru putnog saobraćaja.

U radu se razmatraju svi aspekti ovih specifičnih uskih grla, njihov uticaj na odvijanje vojnog putnog saobraćaja i daju osnovne postavke njegovog pravilnog regulisanja na putnim prelazima.

Ključne reči: putni prelaz, usko grlo, železnički saobraćaj, putni saobraćaj, vremenski gubici.

LEVEL CROSSINGS AS BOTTLENECKS

Summary:

Level crossings represent bottlenecks from the aspect of vehicle capacity as one of basic parameters for traffic flow. From the railway traffic aspect, they represent weak points on railway tracks due to rails exposure to the dynamic influence of road vehicles.

In order to protect traffic safety, appropriate triangles ought to be provided for railway tracks in direction as well as for tracks in curves and low trenches. Participants in road traffic are more in danger than participants in railway traffic. On level crossings with intensive dynamic of railway traffic time and material losses in road traffic are more significant.

All aspects of these specific bottlenecks are treated in this paper as well as their effects on military road transportation.

Key words: level crossing, bottleneck, railway transportation, road transportation, time losses.

Uvod

Putni prelazi preko železničke pruge jesu mesta ukrštanja železničkog i putnog saobraćaja u nivou, na kojima je data prednost kretanju vozova. U ovu kategoriju spadaju i ukrštaji puta i tramvajskog saobraćaja, kao i utopljeni koloseci i

skretnice koji se javljaju kod industrijskih koloseka. Posmatrano sa stanovišta odvijanja putnog saobraćaja putni prelazi predstavljaju uska grla.

Na prugama na kojima je predviđena velika brzina kretanja putni prelazi u nivou su zabranjeni. Pri građenju novih pruga i puteva problem ukrštanja u nivou

često se izbegava, a rešenja traže u izgradnji podvožnjaka i nadvožnjaka, čime se u potpunosti izbegava usko grlo. Međutim, ponekad je neizbežna gradnja putnih prelaza u nivou.

Na davanje prednosti kretanju vozova uticali su sledeći elementi:

- karakteristike voznih sredstava (železničkih i drumskih),
- dužina zaustavnih puteva vozova i drumskih vozila,

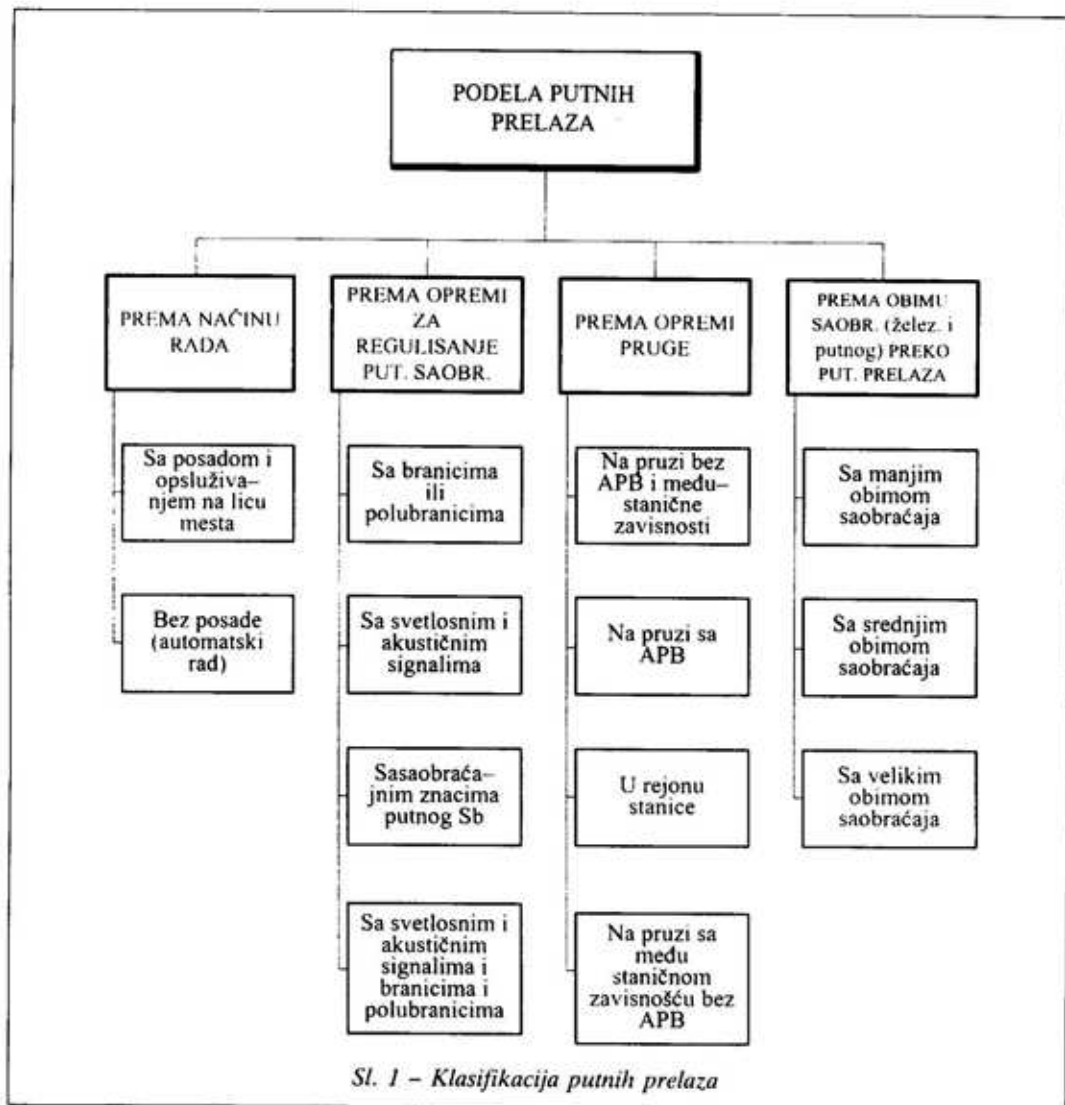
- intenzitet korišćenja putnih prelaza,

- drugi elementi vezani za karakteristike železničkog i putnog saobraćaja.

Vrste putnih prelaza

Putni prelazi mogu se klasifikovati prema sledećim kriterijumima (slika 1):

- načinu rada,



Sl. 1 - Klasifikacija putnih prelaza

- opremi za regulisanje putnog saobraćaja,
- opremi pruge,
- obimu saobraćaja (železničkog i putnog) preko putnih prelaza.

Na postojećim prugama i putevima, došlo je do višestrukog povećanja obima saobraćaja, pogotovo drumskog. Najbolja mera za rešavanje nastalih problema je pretvaranje putnih prelaza na mestima ukrštanja opterećenih pruga i puteva u podvožnjake ili nadvožnjake, što je i najskuplje rešenje. Jeftinije, mada ne sasvim zadovoljavajuće, rešenje predstavlja svođenje više putnih prelaza u nivou na jedan osigurani putni prelaz sa automatskom regulacijom saobraćaja.

Ukrštanja u nivou mogu da budu različitog oblika i veličina – uski pešački prelazi, putni prelazi pod pravim uglom i dijagonalni putni prelazi na putevima sa više traka. Širina putnog prelaza mora da bude jednaka širini puta uvećana za po 0,5 m sa svake strane. Ukoliko postoje i pešačke staze, računaju se i one.

Putni prelazi u nivou prema rangu ukrštanog puta, mogu biti predviđeni za lak saobraćaj, težak saobraćaj i pešački saobraćaj.

Ovakva podela prema saobraćajnom opterećenju prvenstveno utiče na tip kolovozne konstrukcije za putni prelaz. Brzina ne utiče na izbor kolovozne konstrukcije, jer se za sva drumska vozila na putnom prelazu smanjuje. Naime, u zavisnosti od tipa kolovoza i stanja putnog prelaza brzina drumskih vozila iznosi najviše 30 km/h. Putni prelazi za pešački saobraćaj najčešće se nalaze pored glavnog puta ili u stanicama.

Putni prelazi predstavljaju oslabljeno mesto u koloseku, jer su šine izložene dinamičkom uticaju drumskih vozila. Problem je, takođe, i odvodnjavanje koje

je, po pravilu, teško potpuno sprovesti, usled čega često dolazi do razmekšavanja planuma. Na elektrificiranim prugama mora se voditi računa o elektrootpornosti koloseka i preduzeti odgovarajuće mere.

U principu, putni prelazi u nivou treba da budu takvi da uslovi saobraćaja i na putu i na pruzi ne budu bitno poremećeni u odnosu na otvoreni deo pruge ili puta, uz najveću moguću bezbednost saobraćaja.

Preglednost na putnim prelazima

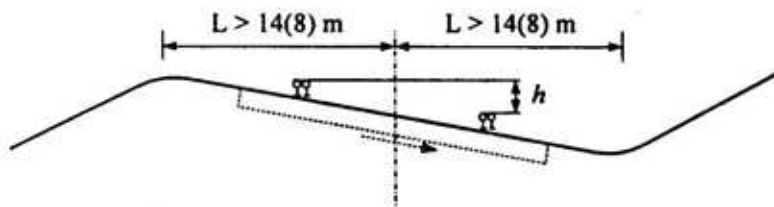
Radi bezbednosti saobraćaja, na mestima ukrštaja javnog puta sa železničkom prugom u istom nivou, moraju se obezbediti tzv. trouglovi preglednosti. Oni su karakteristični kada je kolosek u pravcu, u krivini i blagom useku.

Kolosek u pravcu omogućava podjednaku preglednost za vozila koja dolaze iz oba smera. Propisano je da trouglovi preglednosti imaju dužine stranica 120 m, računajući od tačke preseka ose puta i ose železničke pruge.

Ukoliko je kolosek u krivini, vozilo koje dolazi na ukrštanje sa spoljne strane krivine ima, po pravilu, bolju preglednost nego vozilo koje dolazi iz pravca unutrašnje strane krivine, pa je neophodno povećati stranicu njegovog trougla preglednosti.

Putni prelazi u useku izbegavaju se zbog mnoštva problema koji se pri tom javljaju, kao što su odvodnjavanje, zavejavanje zimi i loša preglednost. Međutim, ako je neophodna izgradnja putnog prelaza u blagom useku, potrebno je nagibe kosina prilagoditi tako da pruže dobru preglednost.

Put treba da se ukršta sa prugom pod pravim uglom, a ako to nije moguće ugao ukrštanja može da bude i oštar, ali



Sl. 2 - Železnička pruga u krivini sa nadvišenjem spoljne šine

ne manji od 45° . Ukrštanja pod oštrim uglom mogu da budu veoma opasna, prvenstveno zbog preglednosti.

Kod pojedinih putnih prelaza pod uglom, naročito kod prelaza sa montažnim betonskim pločama, neophodna je veća širina putnog prelaza od širine puta. Ivica puta ne sme da bude na ivici ploča, jer bi točkovi vozila nailazili na ivice ploča, nesimetrično ih opterećivali i izazivali nejednako sleganje oštećenja.

Prelaz puta preko pruge treba da bude po pravcu i po horizontali na najmanje 14 m sa obe strane ose pruge, a kod sporednih puteva najmanje 8 m. U slučaju da je železnička pruga u krivini i da postoji nadvišenje spoljne šine, put treba na dužini od 8 m sa obe strane ose pruge da bude u istom nagibu kao što je nadvišenje pruge (slika 2).

Ukoliko je pruga u krivini, a to se ne može izbeći, onda ona ne sme imati poluprečnik manji od $r = 400$ m, a putni prelaz ne sme da se nađe u zoni prelaznih krivina.

Građevinsko-tehničke karakteristike putnih prelaza

Na delu putnog prelaza u nivou, uređenje gornjeg stroja mora da bude takvo da može da prihvati i prenese na donji stroj opterećenja koja su ovde, za razliku od otvorenog dela pruge, uvećana

zbog delovanja drumskog saobraćaja. To se posebno odnosi na ukrštanje pruge i puteva sa teškim saobraćajnim opterećenjem. Zbog toga je na putnim prelazima neophodna upotreba šina sa aluminotermitskim varom van putnog prelaza. Ako se upotrebljavaju drveni pragovi, oni moraju biti oštrobriđni, i kod klasičnih putnih prelaza postavljeni sa razmakom od 0,5 m. Kod novijih putnih prelaza, sa površinskim slojem od gumenih ploča, primenjuju se i betonski pragovi, čije međusobno rastojanje može iznositi 0,6 m. Kalemovi koji obezbeđuju propisano odstojanje između vozne šine i kontrašine, postavljaju se na svaki drugi prag, a kolosečni pribor mora biti posebno zaštićen od korozije.

Za stabilan putni prelaz u nivou potreban je određeni kvalitet podloge. Donji stroj mora da bude takav da prihvati sva opterećenja usled dinamičkih udara koji se preko gornjeg stroja prenose na posteljicu.

Izgradnja putnog prelaza u zoni skretница dozvoljava se samo kod sporednih pruga, dok je kod pruga višeg ranga zabranjena zbog mogućnosti oštećenja skretница. Kolovoz od asfalta izbegava se na takvim prelazima, jer je njegovo razaranje zbog održavanja skretница teško i komplikovano. U principu, izbegava se izgradnja putnog prelaza u zoni skretница, zbog zapadanja stranih tela u žlebove

krilne šine, kao i otežanog održavanja skretnica.

Znatno komplikovaniji putni prelazi u nivou, javljaju se pri ukrštaju puta sa više železničkih koloseka. Ovakvi prelazi često se nalaze u urbanim sredinama kod dvokolosečnih i višekolosečnih pruga. Putni prelazi preko više koloseka imaju niz nedostataka. Oni ponekad zahtevaju složeno usaglašavanje niveleta, složeno održavanje i posebno osiguranje. Naime, na ovakvim putnim prelazima obavezno je postavljanje rampi, koje su često spuštene, što rezultira kratkim periodima za prelazak vozila preko ukrštaja. Da bi se to izbeglo, i period prelazaka povećao, neophodna je regulacija saobraćaja zasnovana na brzinama i periodima nailaska vozova na različitim kolosjecima. Putni prelazi preko više koloseka mogu se javiti i u zoni stanica, pa treba voditi računa da prolaze između skretničkih lica. Međutim, i ovde je vreme prolaska kratko, a održavanje putnih prelaza složeno.

Na putnim prelazima kod elektrificiranih pruga postoji opasnost da visoki tereti na drumskim vozilima ugroze živote ljudi zbog mogućeg kontakta tereta i kontaktne mreže. Da bi se izbegla ta mogućnost, postavljaju se tzv. „zaštitne kapije“, radi kontrole visine tereta na vozilima.

Stubovi zaštitne kapije mogu da budu izvedeni od šina ili kao stub kontaktne mreže, i moraju da budu udaljeni od najbližeg koloseka najmanje 10 m (izuzetno 7 m).

Da bi se vozači drumskih vozila upozorili na nailazak na putni prelaz preko elektrificirane pruge, neophodan je saobraćajni znak koji se postavlja na 20 m (ili manje) ispred zaštitne kapije.

Slobodna visina zaštitne kapije iznosi od 4,2 do 4,5 m. U slučaju da je ova

visina manja od 4,5 m, na saobraćajnom znaku mora biti naznačena odgovarajuća smanjena vrednost, uvek za jedan metar manja od visine kontaktnog provodnika.

Na elektrificiranim prugama mora se voditi računa o elektrootpornosti koloseka i, shodno tome, preduzeti odgovarajuće mere.

Putni prelaz – usko grlo na putu

Sa stanovišta protoka vozila, kao jednog od osnovnih parametara za opisivanje saobraćajnog toka, putni prelaz predstavlja usko grlo na putu. Naime, na putnom prelazu dolazi do pojave tzv. povremeno prekinutih saobraćajnih tokova, kod kojih na uslove kretanja vozila, pored njihove međusobne interakcije, utiče i potreba da istu saobraćajnu površinu koriste motorna vozila i sredstva železničkog saobraćaja.

Putni prelaz preko železničke pruge predstavlja usko grlo čak i kad je izveden po opisanim saobraćajno-tehničkim standardima. Međutim, ukoliko ti standardi nisu ispoštovani, što je u praksi čest slučaj, tada putni prelazi predstavljaju ne samo uska grla nego i opasna mesta na putu.

Svaki funkcionalni deo putne mreže (pa i segment puta sa uskim grlom) karakteriše određena maksimalna vrednost protoka vozila pri preovlađujućim uslovima puta, saobraćaja i ambijenta. Vrednost protoka vozila predstavlja kapacitet funkcionalnog elementa putne mreže.

Kako usko grlo predstavlja odsek puta sa najmanjim mogućim protokom, kapacitet te deonice ograničen je na vrednost maksimalno mogućeg protoka na uskom grlu.

U određenim uslovima, i putni prelaz na definisanoj saobraćajnoj deonici

može predstavljati usko grlo sa najnepovoljnijom vrednošću maksimalno mogućeg protoka, što predstavlja kapacitet celokupne deonice. Posmatrano u dužem periodu (npr. u toku jednog časa), na putnom prelazu, zbog potreba železničkog saobraćaja, u više navrata dolazi do povremenog prekida kontinuiteta kretanja u saobraćajnom toku. Dužina perioda prekida, odnosno „blokade“ za putni saobraćaj, kao i njihova učestalost, zavise od karaktera železničkog saobraćaja na posmatranoj deonici pruge. Očito je da će duži i češći prekidi usloviti jači uticaj putnog prelaza kao uskog grla na kapacitet deonice na kojoj se nalazi, odnosno na mogući protok vozila tom deonicom.

Prema teoriji saobraćajnog toka, pod protokom vozila (q) podrazumeva se broj vozila koja prođu određeni presek, odnosno odsek na putu u jedinici vremena:

$$q = V \cdot g \text{ (voz/h)} \quad (1)$$

gde je:

V – brzina saobraćajnog toka (km/h),
 g – gustina saobraćajnog toka (voz/km).

Posmatrano u dužem periodu, protok vozila na putnom prelazu kao uskom grlu može se definisati prema sledećem:

$$q_{UG} = k \cdot q \text{ (voz/h)} \quad (2)$$

gde je:

q_{UG} – protok vozila na uskom grlu (voz/h),
 q – protok vozila pre uskog grla (voz/h),
 k – faktor umanjenja protoka na uskom grlu.

Faktor umanjenja protoka (k) može se definisati kao odnos efektivnog vremena koje je na raspolaganju motornim vozilima (T_e) i ukupnog posmatranog vremenskog perioda (T):

$$k = T_e/T \quad (3)$$

Efektivno vreme raspoloživo za motorna vozila čini razlika između ukupnog perioda posmatranja (T) i vremenskih gubitaka (G) sa aspekta motornog saobraćaja.

Vremenski gubici nastali u saobraćajnom toku zbog prekida kontinuiteta kretanja (d_i) zavise od dužine vremena za koje je putni prelaz blokiran za motorni saobraćaj (t_i), kao i parametara saobraćajnog toka pre putnog prelaza i posle njega (brzina i gustina saobraćajnog toka pre putnog prelaza, odnosno brzina i gustina saobraćajnog toka pri pokretanju zaustavljenog niza vozila).

Vremenski gubici mogu se izraziti prema sledećem:

$$G = \sum_{i=1}^n d_i \text{ (h)} \quad (4)$$

Uz prikazanu analizu vremenskih gubitaka u saobraćajnom toku, izraz za protok vozila na uskom grlu glasi:

$$q_{UG} = q \{1 - [\sum d_i/T]\} \text{ (voz/h)} \quad (5)$$

Vreme zauzetosti putnog prelaza (t_i) zavisi od dinamike i ostalih karakteristika železničkog saobraćaja (dužina i brzina vozne kompozicije, operativne karakteristike signalno-sigurnosnih elemenata i sl.).

Kada se izmene uslovi puta i okruženja ili dođe do priliva, odnosno odlivanja vozila iz saobraćajnog toka, saobraćajni tok prelazi iz jednog kvalitativnog stanja (q_1, g_1) u drugo (q_2, g_2).

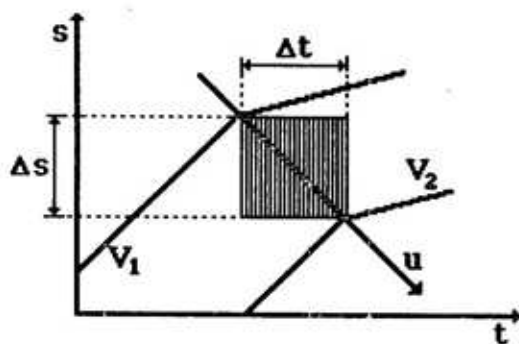
Pri promeni stanja dolazi do pojave talasa koji se kreću duž saobraćajnice u pravcu kretanja saobraćajnog toka, su-

protino od njegovog kretanja, ili unazad u odnosu na saobraćajnicu. Skokovita promena osnovnih parametara saobraćajnog toka (brzine i gustine toka) duž saobraćajnice praćena je tzv. „šok talasom“ (udarnim, odnosno odbojnim talasom). Osnovne karakteristike talasa su brzina i smer prostiranja (slika 3).

Brzinu talasa moguće je odrediti i sa dijagrama koji opisuje zavisnost protoka vozila od gustine toka (tzv. q-g dijagram), prikazan na slici 4.

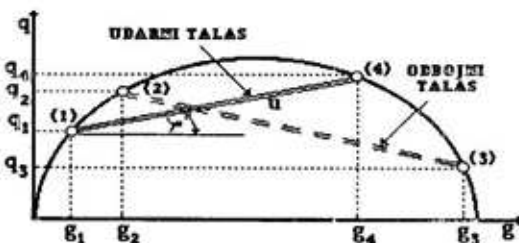
Vrednost brzine talasa u saobraćajnom toku, koji prelazi iz stanja (1) u stanje (4), predstavlja količnik razlike veličina protoka vozila i razlike gustina toka za data stanja, a izračunava se prema obrascu:

$$u_{1,4} = \operatorname{tg} \varphi = (\Delta q / \Delta g) = (q_1 - q_4) / (g_1 - g_4) = [(V_1 g_1) - (V_4 g_4)] / (g_1 - g_4) \quad (6)$$



Sl. 3 – Prikaz talasa u saobraćajnom toku:

u – brzina talasa (km/h), V_1 – brzina saobraćajnog toka pre promene stanja (km/h), V_2 – brzina saobraćajnog toka posle promene stanja (km/h)



Sl. 4 – Udarni i odbojni talasi

gde je:

φ – ugao „nagiba“ brzine talasa pri prelazu iz stanja (1) u stanje (4) ($^\circ$),

Δq – razlika protoka vozila pri prelazu iz stanja (1) u stanje (4) (voz/h),

Δg – razlika gustina toka pri prelazu iz stanja (1) u stanje (4) (voz/km),

q_1 – protok vozila u stanju (1) (voz/h),

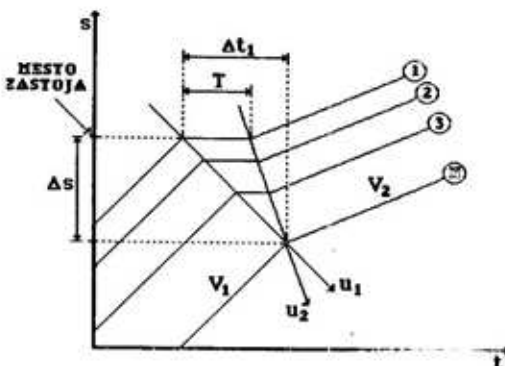
q_4 – protok vozila u stanju (4) (voz/h),

g_1 – gustina toka u stanju (1) (voz/km),

g_4 – gustina toka u stanju (4) (voz/km),

V_1 – brzina toka u stanju (1) (km/h),

V_4 – brzina toka u stanju (4) (km/h).



Sl. 5 – Prikaz zastoja vozila u saobraćajnom toku

Pri zastoju vozila u saobraćajnom toku (tipičan primer je zaustavljanje vozila ispred putnog prelaza) sa gledišta pojedinačnog učesnika u saobraćaju, posebno su značajni vremenski gubici nastali zbog stajanja, čekanja i kašnjenja.

Na slici 5 prikazano je zaustavljanje vozila u saobraćajnom toku pri nailasku na putni prelaz koji je blokiran za saobraćaj (vreme blokade na slici označeno je sa T).

Prema slici 5 brzine talasa koji se javljaju u saobraćajnom toku pri zaustavljanju, odnosno pokretanju zaustavljenog niza su:

$$u_1 = \Delta s / \Delta t_1, \quad (7)$$

$$u_2 = \Delta S / \Delta t_2 = \Delta S / (\Delta t_1 - T) \quad (8) \quad N = (u_1 T u_2 g_m) / (u_2 - u_1) \text{ (vozila)} \quad (13)$$

Veličina Δt_1 predstavlja vreme proteklo od trenutka nastanka blokade za saobraćaj do trenutka kada blokada više nema uticaja na vozila koja pristižu na putni prelaz. Očigledno da je to vreme veće od stvarnog vremena postojanja blokade.

Veličina ΔS predstavlja dužinu puta na kojem se vozila zaustavljaju.

Iz relacija za brzine talasa proizilazi da je:

$$\Delta t_1 = (T u_2) / (u_2 - u_1) \text{ (min)} \quad (9)$$

gde je:

T - vreme stajanja prvog vozila u nizu, odnosno vreme trajanja blokade (min),
 u_1 - brzina talasa u saobraćajnom toku pri zaustavljanju vozila (m/min),
 u_2 - brzina talasa u saobraćajnom toku pri pokretanju vozila (m/min).

Broj vozila prinuđenih na zaustavljanje određen je izrazom:

$$N = \Delta S / X_{\min} \quad (10)$$

gde je X_{\min} odstojanje između čela zaustavljenih vozila (m).

S obzirom na to da maksimalna gustina vozila pri zaustavljenom nizu (g_m) odgovara recipročnoj vrednosti odstojanja između čela zaustavljenih vozila, vrede sledeće relacije:

$$N = \Delta S g_m, \quad (11)$$

odnosno

$$N = u_1 \Delta t_1 g_m \quad (12)$$

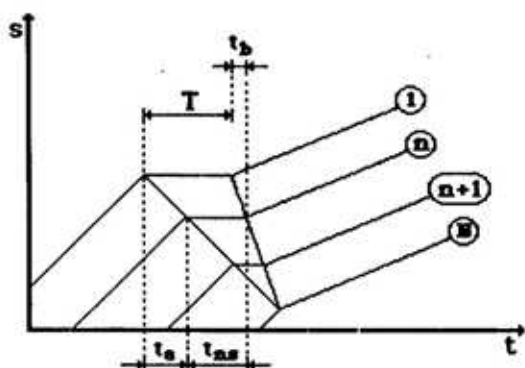
Zamenom za $\Delta t_1 = (T u_2) / (u_2 - u_1)$ dobija se da je:

Ako stanje (1) predstavlja stanje saobraćajnog toka pre nailaska na prelaz, a stanje (2) posle pokretanja zaustavljenog niza vozila, a imajući u vidu da je u stanju zaustavljenog niza vozila protok jednak nuli, tada obrasci za brzinu talasa pri zaustavljanju, odnosno pokretanju niza glase:

$$u_1 = [q_1 / (g_m - g_1)], \quad (14)$$

odnosno

$$u_2 = [q_2 / (g_m - g_2)]. \quad (15)$$



Sl. 6 - Vreme stajanja

Broj vozila prinuđenih na zaustavljanje u funkciji osnovnih parametara toka (protoka vozila i gustina), iznosi:

$$N = (T q_1 q_2 g_m) / [q_2 (g_m - g_1) - q_1 (g_m - g_2)] \text{ (vozila)}. \quad (16)$$

Sa slike 6 očigledno je da sva vozila prinuđena na zaustavljanje neće stajati jednak period.

Vreme stajanja n-tog vozila u zaustavljenom nizu računa se prema obrascu:

$$t_{ns} = T - [(n - 1) t_a - (n - 1) t_b] = T - [(n - 1) (t_a - t_b)], \quad (17)$$

gde je:

T – vreme stajanja prvog vozila u nizu (s),
 n – redni broj zaustavljenog vozila u odnosu na prvo u nizu,

t_a – interval između dva uzastopna zaustavljanja vozila (s),

t_b – interval između polazaka dva uzastopna vozila (s).

S obzirom na to da je: $X_{min} = 1/g_m$ i uz $u_1 = 1/(g_m t_a)$ i $u_2 = 1/(g_m t_b)$, sledi:

$$t_{ns} = [(n-1)/g_m] [(1/u_1) - (1/u_2)]. \quad (18)$$

Zamenom obrazaca za vrednosti brzina odbojnih talasa u_1 i u_2 dobija se vreme stajanja n -tog vozila u nizu:

$$t_{ns} = T - \{[(n-1)/g_m] [(g_m - g_1)/q_1 - (g_m - g_2)/q_2]\} \quad (19)$$

Vreme stajanja svih vozila u toku (tzv. totalno vreme stajanja) proizilazi iz uslova:

$$T_H = \sum_{i=1}^N t_{ns} = N T_n \quad (20)$$

gde je:

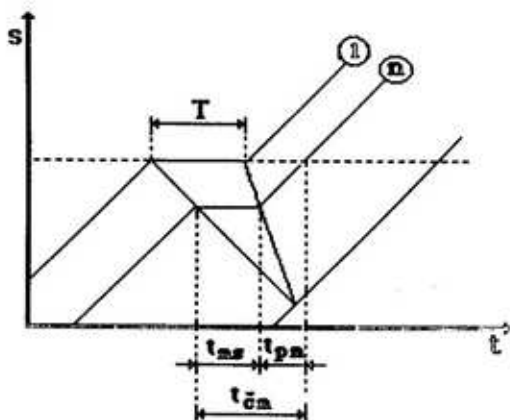
T_n – prosečno vreme stajanja vozila, izračunava se prema obrascu

$$T_n = T - \{0,5 [(N-1)/g_m] [(1/u_1) - (1/u_2)]\} \quad (21)$$

Dakle, totalno vreme stajanja je:

$$T_H = N T - \{[N(N-1)/2 g_m] [(g_m - g_1)/q_1 - (g_m - g_2)/q_2]\} \quad (22)$$

Pored vremena stajanja (t_{ns}) u vreme čekanja uključeno je i vreme potrebno za dolazak vozila sa njegove pozicije u zaustavljenom nizu na putni prelaz, odnosno na presek puta koji je uslovio zaustavljanje vozila (t_{pn}).



Sl. 7 – Vreme čekanja

Prema slici 7, vreme čekanja n -tog vozila iz zaustavljenog niza izračunava se prema obrascu:

$$t_{cn} = t_{ns} + t_{pn}, \quad (23)$$

odnosno

$$t_{cn} = T - \{[(n-1)/g_m] [(1/u_1) - (1/u_2)]\} + t_{pn} \quad (24)$$

Vreme t_{pn} iznosi:

$$t_{pn} = [(n-1) X_{min}]/V_2 = [(n-1) g_2]/(q_2 g_m) \quad (25)$$

Vreme čekanja n -tog vozila je:

$$T_n = T - [(n-1)/g_m] \{[(g_m - g_1)/q_1 - (g_m - g_2)/q_2] - (g_2/q_2)\} \quad (26)$$

odnosno

$$t_{cn} = T - [(n-1)/g_m] \{[(g_m - g_1)/q_1] - (g_m/q_2)\} \quad (27)$$

Totalno vreme čekanja (zbirno vreme čekanja svih zaustavljenih vozila) je:

$$T_c = T_H + T_{pn} \quad (28)$$

Pri tome je:

$$T_{pn} = [(N-1) N g_2] / (2 g_m q_2) \quad (29)$$

Zamenom se dobija da je:

$$T_c = N T - \{ [N(N-1)/2 g_m] [(g_m - g_1)/q_1 - (g_m/q_2)] \} \quad (30)$$

Prosečno vreme čekanja vozila u nizu iznosi:

$$T_c = T - \{ [(N-1)/g_m] [(g_m - g_1)/q_1 - (g_m/q_2)] \} \quad (31)$$

Od posebnog značaja je stvarno izgubljeno vreme zbog zastoja u saobraćajnom toku, što predstavlja tzv. vreme kašnjenja, odnosno, period koji protekne od trenutka kada bi n-to vozilo iz zaustavljene niza prošlo putni prelaz da on nije bio blokiran za saobraćaj.

Prema slici 8 vreme kašnjenja n-tog vozila, iz niza zaustavljenih vozila, izračunava se prema sledećem:

$$t_{kn} = t_{cn} - t_{dn} \quad (32)$$

$$t_{dn} = [(n-1)g_1] / (g_m q_1) \quad (33)$$

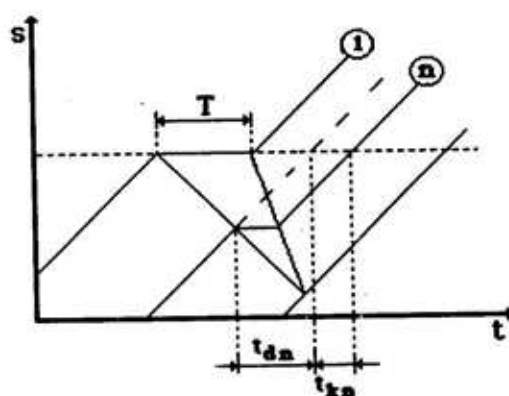
$$t_{kn} = T - \{ [(n-1)/g_m] [g_m/q_1 - (g_m/q_2)] \} \quad (34)$$

Totalno vreme kašnjenja je:

$$T_k = T_c - T_{dn} \quad (35)$$

$$T_{dn} = \sum t_{dn} = [N(N-1)g_1] / (2 g_m q_1) \quad (36)$$

$$T_k = N T - \{ [N(N-1)/2] [(1/q_1) - (1/q_2)] \} \quad (37)$$



Sl. 8 - Vreme kašnjenja

Prosečno vreme kašnjenja je:

$$T_k = T - \{ [(N-1)/2] [(1/q_1) - (1/q_2)] \} \quad (38)$$

Primenom odgovarajućih koeficijenta moguće je formirati jedinstvene opšte obrasce za totalna i prosečna vremena stajanja, čekanja i kašnjenja.

Totalna vremena su:

$$T_t = N T - \{ [N(N-1)/2 g_m] [(g_m - a g_1)/q_1 - (g_m - b g_2/q_2)] \} \quad (39)$$

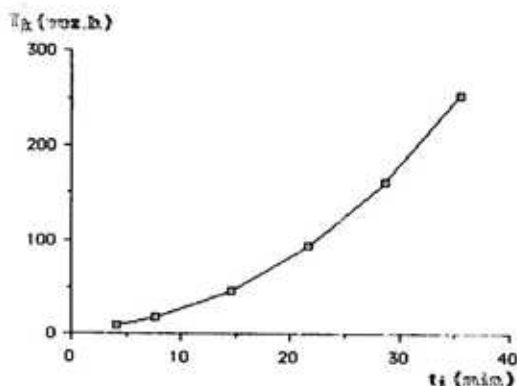
Prosečna vremena su:

$$T_{pros.} = T - \{ [(N-1)/2 g_m] [g_m - a g_1/q_1 - (g_m - b g_2/q_2)] \} \quad (40)$$

Pripadajući koeficijenti iznose:

- za vreme stajanja $a = 1$ $b = 1$,
- za vreme čekanja $a = 1$ $b = 0$,
- za vreme kašnjenja $a = 0$ $b = 0$.

Na slici 9 prikazani su ukupni vremenski gubici u saobraćajnom toku, u zavisnosti od dužine trajanja blokade putnog prelaza (simulirano je vreme kašnjenja



Sl. 9 – Ukupni vremenski gubici u zavisnosti od vremena trajanja blokade

nja¹). Može se uočiti značajan porast ukupnih vremenskih gubitaka svih vozila na čije kretanje je ispoljen uticaj blokade putnog prelaza (T_k) u zavisnosti od dužine trajanja blokade (t_i).

Izloženi analitički prikaz stanja i vremenskih gubitaka u saobraćajnom toku zasnovan je na tzv. determinističkom pristupu, koji podrazumeva operacije sa prosečnim vrednostima osnovnih parametara saobraćajnog toka (brzina, gustina, intervali između vozila i sl.). Međutim, u realnim putnim, saobraćajnim i ambijentalnim uslovima nailazak vozila na određeni presek puta, dakle i putni prelaz, predstavlja pojavu slučajnog karaktera.

Za saobraćajne tokove relativno niskog intenziteta, odnosno gustine, i uz neznatne varijacije intenziteta u vremenu (stacionarnost), protok vozila koja pristižu na određeni presek puta može se uspešno opisivati Pausonovom raspodelom.

¹ Ulazni podaci:
 - protok vozila pre nailaska na putni prelaz $q_1 = 900$ voz/h,
 - protok vozila pri pokretanju niza vozila $q_2 = 1800$ voz/h,
 - maksimalna gustina vozila u zaustavljenom nizu $g_m = 100$ voz/km,
 - vreme trajanja blokade menjano je od 3 do 35 minuta.

Verovatnoća pojave jednog vozila na intervalu Δt proporcionalna je dužini tog intervala:

$$P_1 = P_1(\Delta t) = \lambda(\Delta t) = (N/T) (\Delta t) \quad (41)$$

gde je:

N – broj vozila koja su se pojavila u vremenu T (vozila),

T – vreme u kojem je osmatrano pojavljivanje vozila (h).

Odnos $\lambda = (N/T)$ predstavlja prosečan broj vozila koja su prošla određeni presek na putu.

Verovatnoća $P_0(t)$, da se u okviru intervala (t) ne pojavi nijedno vozilo, tj. verovatnoća da interval sleđenja među uzastopnim vozilima bude jednak intervalu (t), računa se prema obrascu:

$$P_0(t) = e^{-\lambda t} \quad (42)$$

Verovatnoća $P_x(t)$, da se u okviru intervala (t) na preseku puta pojavi x vozila, računa se prema obrascu:

$$P_x(t) = [(\lambda t)^x / x!] e^{-\lambda t} \quad (43)$$

Binomnoj raspodeli pokorava se protok vozila na preseku puta najčešće u slučajevima kada se javlja nagomilavanje vozila na preseku, tj. pri pojavi stvaranja kolona na određenim deonicama. Kada se vozila nagomilavaju na određenoj deonici puta, odnosno ispred određenog preseka, verovatnoća da će se u određenom intervalu pojaviti vozilo veoma je velika.

Obrazac za izračunavanje verovatnoće pojave vozila na preseku glasi:

$$p_x = \binom{n}{x} p^x q^{(n-x)} = [n! / x!(n-x)!] p^x q^{(n-x)} \quad (44)$$

gde je:

n – maksimalan broj vozila koja mogu da

produ posmatranim presekom puta u posmatranom intervalu,

p – verovatnoća da će jedno vozilo proći presekom puta u posmatranom intervalu.

Negativna binomna raspodela pogodna je za opisivanje protoka značajnih disperzija. Takvi se uslovi u saobraćajnom toku javljaju na putnom prelazu sa većom učestalošću blokade. Naime, u tim uslovima protok vozila na prelazu u jednakim intervalima ima čas veliku, a čas malu vrednost.

Obrazac za izračunavanje verovatnoće pojave x vozila na preseku glasi:

$$P(X = x) = \binom{x+k-1}{k-1} p^k (1-p)^x = \frac{(x+k-1)!}{[(k-1)!(x)!]} p^k (1-p)^x \quad (45)$$

gde je:

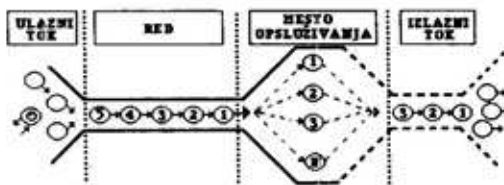
$(x+k)$ – maksimalan broj vozila koji može da prođe kroz presek puta u intervalu t ,

p – verovatnoća da će jedno vozilo da prođe kroz presek puta u posmatranom intervalu.

Pogodnost opisivanja osnovnih parametara saobraćajnog toka nekom od izloženih raspodela predstavlja indikaciju koja terminologijom stohastike govori o vladajućim uslovima u saobraćajnom toku na posmatranoj deonici, odnosno preseku.

Pri nailasku vozila na blokiran putni prelaz dolazi do njihovog zaustavljanja, obrazovanja reda i čekanja vozila „na opsluživanje“.

U takvim uslovima saobraćajni tok se može posmatrati i kao tok (potok) klijenata koji zahtevaju „opslugu“ u slučajevima postojanja uskih grla na saobraćajnici (slika 10).



Sl. 10 – Putni prelaz kao sistem masovnog opsluživanja

Tada dolazi do formiranja redova ispred uskih grla, a time i do stanovitih vremenskih, odnosno materijalnih gubitaka.

Da bi se sagledale važne komponente ovakvog sistema masovnog opsluživanja sa čekanjem, potrebno je poznavati sledeće parametre:

q – protok vozila pre uskog grla (voz/min),

C – maksimalni protok (kapacitet) pre uskog grla (voz/min),

q_{ug} – protok uskim grlom² za vreme blokade (voz/min),

t_{ug} – vreme trajanja blokade (min),

t_0 – vreme normalizacije (nestajanje reda) (min),

t_q – vreme trajanja reda³ (min).

Na osnovu istraživanja Maya⁴ uspostavljene su sledeće relacije:

– vreme trajanja reda

$$t_q = t_{ug}[(C - q_{ug})/(C - q)] \quad (46)$$

² Veličina protoka vozila kroz usko grlo jednaka je nuli ($q_r = 0$) kada je put potpuno blokiran, što je slučaj sa prelazom preko železničke pruge kada je branik spušten, odnosno ima neku realnu vrednost ($q_r < q$) u slučaju kada je put delimično blokiran (havarisano vozilo, odron na putu i sl.).

³ To je vreme proteklo od momenta nastanka prepreke do momenta nestajanja reda nakon uklanjanja prepreke, odnosno to je zbir vremena trajanja blokade i vremena potrebnog za nestajanje reda: $t_q = t_{ug} + t_0$.

⁴ Veoma značajan rad u kojem je posebno obrađen pomenuti problem je: May A.D., „Traffic flow theory – the traffic engineers challenge“, Proc. Inst. Traffic Eng. (1965). U radu: May A.D., Jr., and Keller H.E.M., „A deterministic queueing model“, Transportation Research, 1, 1967., primenjen je poseban metod pri analizi karakteristika redova vozila u tzv. špicevima, gde je pretpostavljeno da za konstantan kapacitet puta (C) zahtevi za prevoženjem mogu premašiti vrednost kapaciteta ($q > C$).

- broj vozila na koja je uticalo postojanje uskog grla

$$N = qt_q \text{ (vozila)} \quad (47)$$

- maksimalan broj vozila u redu

$$N_m = t_{ug} (q - q_{ug}) \text{ (vozila)} \quad (48)$$

- prosečan broj vozila u redu

$$N_r = N_m/2 \text{ (vozila)} \quad (49)$$

- ukupno vreme čekanja

$$D = [t_{ug} t_q(q - q_{ug})]/2 \text{ (vozilo-minuta)} \quad (50)$$

- prosečno vreme čekanja po jednom vozilu

$$d = (t_{ug}/2) [1 - (q_{ug}/q)] \text{ (min)} \quad (51)$$

- maksimalno vreme čekanja jednog vozila

$$d_{max} = t_{ug}[1 - (q_{ug}/q)] \text{ (min)} \quad (52)$$

Primenom ovih obrazaca na uslove iz primera simulacije vremena kašnjenja, dobijaju se rezultati prikazani u tabeli,

Rezultati simulacije vremena kašnjenja na putnom prelazu

t_{ug} (min)	t_q (min)	N (voz)	N_m (voz)	N_r (voz)	D (voz-h)	d (min)	d_{max} (min)
7	14	210	105	53	12	3,5	7
14	28	420	210	106	49	7	14
21	42	630	315	159	110	10,5	21
28	56	840	420	212	196	14	28
35	70	1050	525	265	306	17,5	35

Ukupno vreme čekanja D izraženo je u jedinici vozila - časova, radi lakše komparacije sa rezultatima dobijenim iz primera simulacije vremena kašnjenja vozila u zavisnosti od dužine trajanja blokade

koji su saglasni sa rezultatima simulacije⁵ prikazanim na dijagramu na slici 9.

Rezultati iz tabele govore o značajnim vremenskim gubicima u saobraćajnom toku većeg intenziteta ($q = 900$ voz/h) i za veće vrednosti vremena trajanja blokade (npr. za trajanje blokade od 14 minuta prosečni vremenski gubitak po svakom vozilu, koje je bilo prinuđeno da se zaustavi, iznosi 7 minuta, što ukupno čini čak 49 vozilo-časova, odnosno oko dva vozilo-dana).

Bezbednost i regulisanje saobraćaja na putnim prelazima

Bezbednost saobraćaja na putnim prelazima podrazumeva bezbednost i putnog i železničkog saobraćaja zajedno. Naročito je ugrožen putni saobraćaj, zbog dugih čekanja na putnim prelazima kada se očekuje nailazak voza i kada je rampa spuštена, ako je putni prelaz osiguran, ili bar zbog smanjenja brzine vozila, čak i kada je putni prelaz slobodan. Održavanje putnih prelaza predstavlja brigu železničke organizacije, u šta se ulažu materijalna sredstva i ljudski rad.

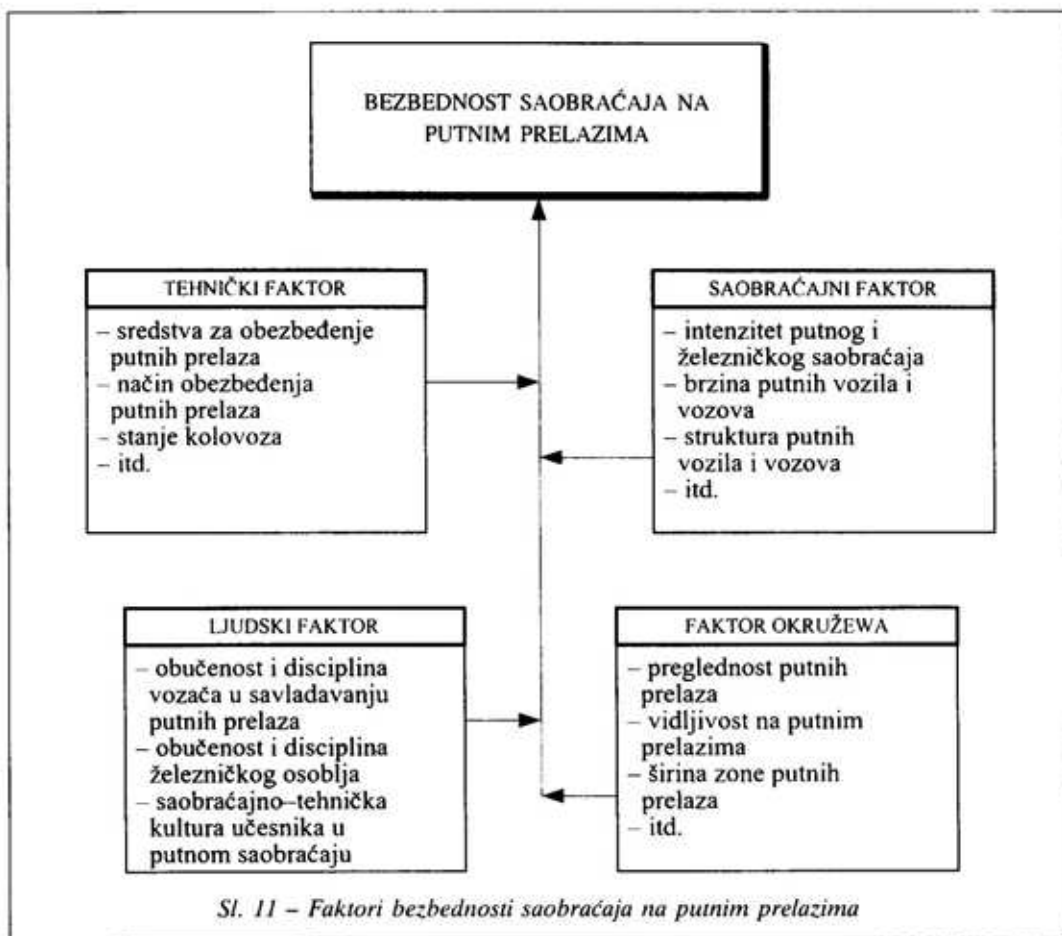
Faktori bezbednosti saobraćaja na putnim prelazima prikazani su na slici 11.

Bezbednost saobraćaja na putnim prelazima u velikoj meri zavisi od tehničkog faktora, koji podrazumeva stepen opremljenosti putnih prelaza odgovarajućim sredstvima za regulisanje saobraćaja, način obezbeđenja putnih prelaza i stanje kolovoza preko putnih prelaza.

Na nivo bezbednosti saobraćaja na putnim prelazima znatno utiče saobra-

⁵ Rezultati u tabeli dobijeni su na osnovu podataka iz primera simulacije:

- protok vozila pre putnog prelaza $q = 900$ voz/h = 15 voz/min,
- kapacitet pre putnog prelaza $C = 1800$ voz/h = 30 voz/min,
- vreme trajanja blokade (t_{ug}) menjano je od 7 do 35 minuta.



Sl. 11 – Faktori bezbednosti saobraćaja na putnim prelazima

ćajni faktor, izražen preko intenziteta putnog i železničkog saobraćaja, brzine vozila i vozova, i njihove strukture.

Obučenosť i disciplina vozača vozila u savladavanju putnih prelaza, obučenosť i disciplina železničkog osoblja, i saobraćajnotehnička kultura učesnika u putnom saobraćaju, ključni su elementi bezbednosti saobraćaja na putnim prelazima, a svi zajedno pripadaju grupi ljudskog faktora.

Okruženje sa svojim elementima (preglednosť i vidljivosť na putnim prelazima, širina zona putnih prelaza, i sl.), takođe bitno utiče na nivo bezbednosti saobraćaja na putnim prelazima.

Na putnim prelazima nastaje znatan broj saobraćajnih nezgoda. Takve saobraćajne nezgode spadaju, prema posledicama, u kategoriju najtežih (obično s ljudskim žrtvama i s velikom materijalnom štetom).

Od ukupnog broja železničkih saobraćajnih nezgoda, odnosno vanrednih događaja, u 1984. godini, 32% odnosi se na saobraćajne nezgode nastale u konfliktu sa putnim saobraćajem, a od tih nezgoda 44% se dogodilo na putnim prelazima a 56% na otvorenoj pruzi.

Na putnim prelazima u nivou, radi izbegavanja saobraćajnih nezgoda, mora

se obezbediti kvalitetno regulisanje putnog i železničkog saobraćaja.

Za regulisanje saobraćaja na putnim prelazima koriste se odgovarajuća tehnička sredstva. Ona se mogu, u osnovi, podeliti na dve grupe, i to:

- sredstva namenjena učesnicima u putnom saobraćaju,
- sredstva namenjena učesnicima u železničkom saobraćaju.

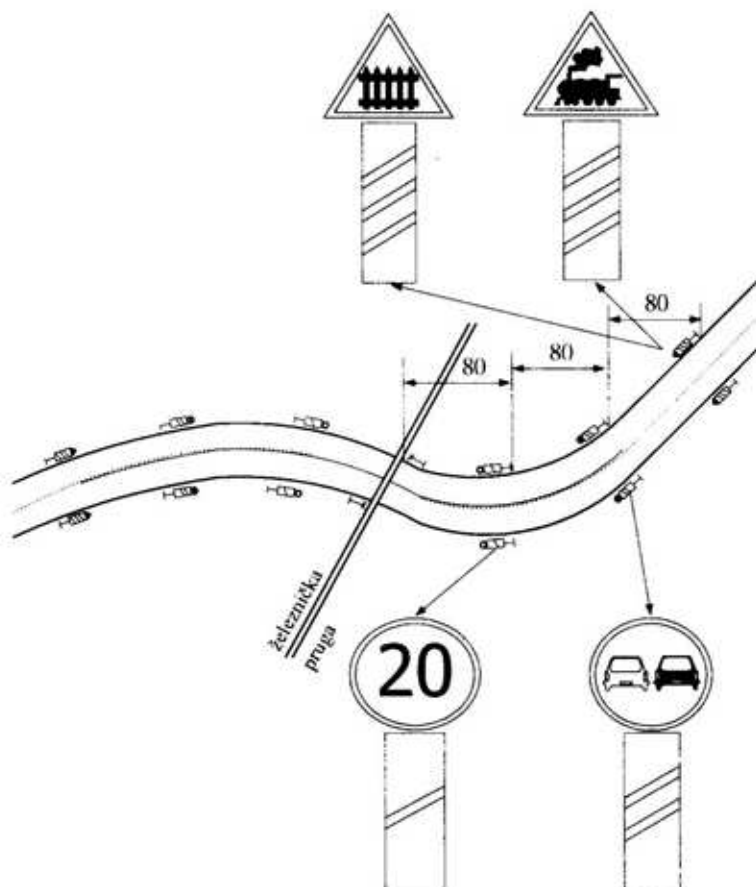
Učesnicima u putnom saobraćaju namenjeni su saobraćajni znaci – signali koji mogu davati nepromenljive i promenljive znake. Nepromenljivi ili stalni znaci

postavljaju se na tačno određenim mestima pored puta, kao što je prikazano na slici 12.

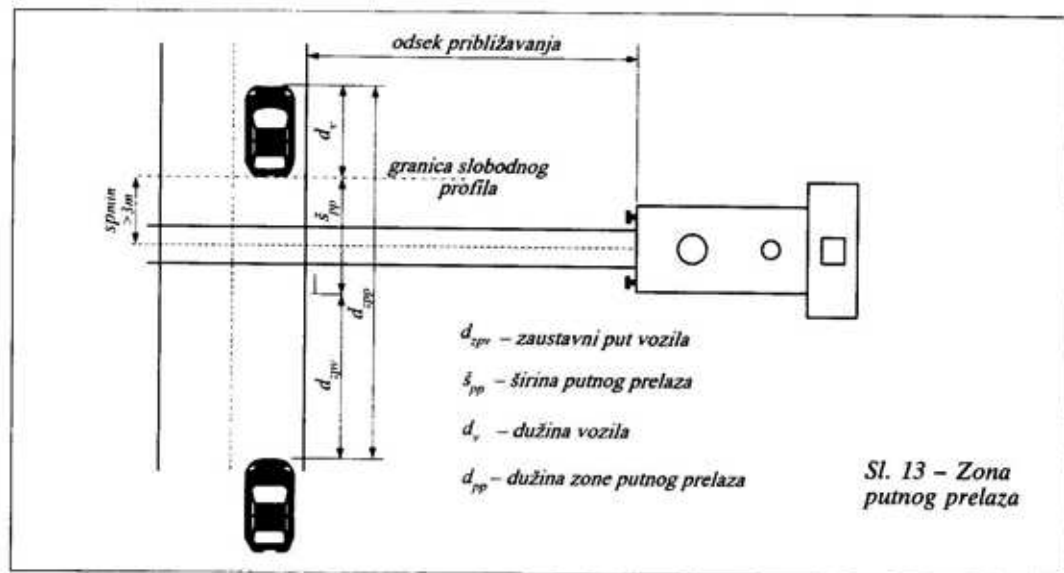
Kao dopuna stalnim znacima ugrađuju se signali koji daju povremene znake, to su putni svetlosni signal-treptač i akustični (zvučni) signal.

Neposredno do železničke pruge nalaze se branci ili polubranici koji služe za zatvaranje saobraćaja.

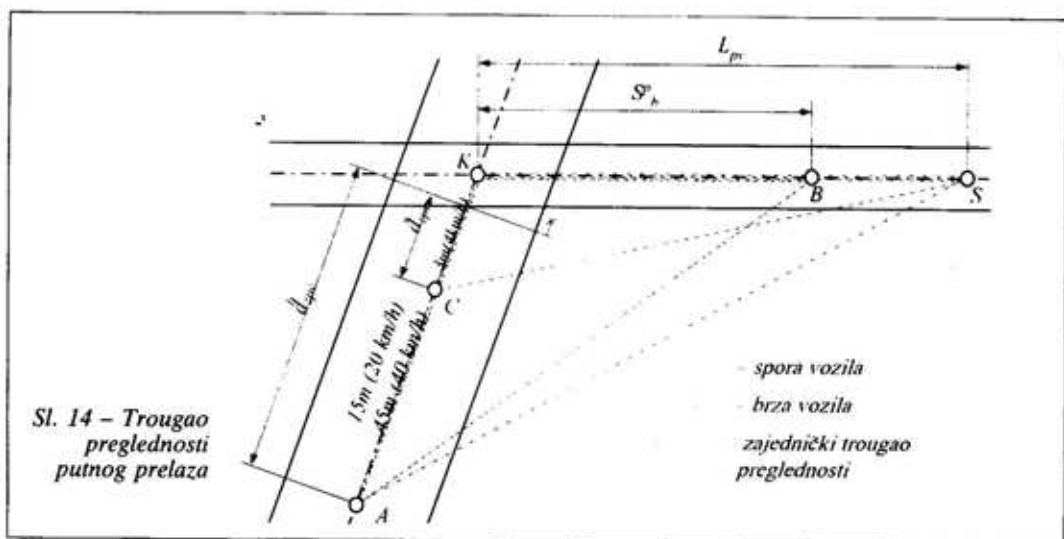
Učesnicima u železničkom saobraćaju namenjeni su signali koji daju promenljive i nepromenljive signalne znake. Signalni stub, označava početak zaustav-



Sl. 12 – Lokacija saobraćajnih znakova na putnom prelazu



Sl. 13 – Zona putnog prelaza



Sl. 14 – Trougao preglednosti putnog prelaza

nog puta voza ispred putnog prelaza, a postavlja se ispred putnih prelaza na daljini zaustavnog puta voza. Vozno osoblje obaveštava se o postojanju i obezbeđenju putnog prelaza pomoću kontrolnog signala na automatskom uređaju. Ispred ovog signala pored koloseka postavlja se nepromenljivi signal koji daje informaciju da treba očekivati kontrolni signal.

Radi pravilnog postavljanja signala, odnosno saobraćajnih znakova, moraju se poznavati određeni elementi putnog prelaza, a to su:

- zona putnog prelaza,
- granica približavanja,
- trougao preglednosti.

Zonu putnog prelaza čini put koji vozilo mora preći kada se nađe na daljini svog zaustavnog puta do mesta bezbed-

nog zaustavljanja ispred granice slobodnog profila pruge (slika 13).

Dužina zone putnog prelaza zavisi od ugla koji zatvaraju ose puta i železničke pruge. Temena trougla preglednosti nalaze se u sledećim tačkama: početku zaustavnog puta vozila, početku odseka približavanja voza (L_{pv}) i tački preseka ose puta i ose pruge (slika 14).

Dužina odseka približavanja određena je zaustavnim putem voza. U trouglu preglednosti ne bi trebalo da se nađe bilo koja prepreka koja bi onemogućila dobru vidljivost sa puta na prugu i obratno.

Zaključak

Svako ukrštanje železničkog i putnog saobraćaja u nivou predstavlja usko grlo za odvijanje putnog saobraćaja. Putni prelaz preko železničke pruge je usko grlo čak i kada je izveden po propisanim standardima, a ukoliko ti standardi nisu ispoštovani, što je u praksi čest slučaj, tada putni prelazi predstavljaju ne samo uska grla nego i opasne tačke na putnoj mreži.

Sa stanovišta bezbednosti saobraćaja na tim mestima putni saobraćaj je znatno ugroženiji, jer su i mase železničkih vozila znatno veće, sa višestruko dužim zaustavnim putevima, što je jedan od osnovnih razloga davanja prednosti saobraćaju vozova.

Sa stanovišta efikasnosti putnog saobraćaja, na funkcionalnom elementu putne mreže koji sadrži putni prelaz u nivou, dolazi do smanjenja kapaciteta deonice, odnosno do povećavanja vremenskih i materijalnih gubitaka. Ti gubici su značajniji što je veći intenzitet železničkog i putnog saobraćaja na putnom prelazu.

Poznavanjem relevantnih parametara železničkog i putnog saobraćaja za

dati putni prelaz, i njihovim usklađivanjem, mogu se postići značajne uštede, naročito u okviru putnog saobraćaja.

Sa stanovišta vojnog putnog saobraćaja, pogotovo kolonskog, za organe nadležne za planiranje i realizaciju kretanja od posebnog je značaja dobro poznavanje karakteristika, železničkog i ostalog putnog saobraćaja na datom putnom pravcu.

Bezbednost saobraćaja na putnim prelazima predstavlja stalnu brigu celokupne železničke organizacije i putnih saobraćajnih organizacija. Vojska Jugoslavije kod organizovanog ili pojedinačnog kretanja svojih drumskih vozila tom pitanju poklanja zasluženu pažnju.

Jedna od osnovnih mera izbegavanja putnih prelaza kao uskih grla jeste denivelacija putnih prelaza, odnosno njihovo pretvaranje u podvožnjake ili nadvožnjake. To je jedna od najskupljih tehničkih mera, pa se u poslednje vreme pribegava ukidanju pojedinih prelaza i njihovom svodenju na manji broj prelaza osiguranih savremenim automatskim uređajima visoke pouzdanosti.

Literatura:

- [1] Kuzović, Lj.: Teorija saobraćajnog toka, Građevinska knjiga, Beograd, 1987.
- [2] Leutzbach, W.: Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses, Berlin, 1972.
- [3] Jovanović, G.: Saobraćajni tokovi, CVTŠ, KoV, Zagreb, 1988.
- [4] Siljanov, V. V.: Teorija transportnih potokova u projektiranju dorogi organizaciji dviženija, Transport, Moskva, 1977.
- [5] Vukadinović, S.: Elementi verovatnoće i matematičke statistike, Privredni pregled, Beograd, 1978.
- [6] Vukadinović, S.: Elementi teorije masovnog opsluživanja, Saobraćajni fakultet, Beograd, 1983.
- [7] Miličević, M.: Tehnički sistemi za regulisanje i bezbednost železničkog saobraćaja, Saobraćajni fakultet, Beograd, 1982.
- [8] Jovanović, D.: Faktori bezbednosti železničkog saobraćaja, Zbornik radova savetovanja Bezbednost putnog i železničkog saobraćaja u oružanim snagama, Zagreb, 1989.
- [9] Jovanović, D.: Stanje bezbednosti železničkog saobraćaja, Zbornik radova savetovanja Bezbednost putnog i železničkog saobraćaja u oružanim snagama, Zagreb, 1989.